

4/5/5 (Item 4 from file: 351) [Links](#)

Fulltext available through: [Order File History](#)

Derwent WPI

(c) 2008 The Thomson Corporation. All rights reserved.

0007125367 & & *Drawing available*

WPI Acc no: 1995-157000/199521

XRPX Acc No: N1995-123674

**Flexible superconducting cable conductor - has several tape-shaped superconducting multifilament wires wound side-by-side on insulating layer**

Patent Assignee: SUMITOMO ELECTRIC IND CO (SUME); TOKYO ELECTRIC POWER CO INC (TOEP)

Inventor: FUJIGAMI; FUJIKAMI J; HARA C; HARA T; ISHII H; SATO K; SHIBUTA N

Patent Family ( 7 patents, 7 & countries )

Patent Number	Kind	Date	Application Number	Kind	Date	Update	Type
EP 650205	A1	19950426	EP 1994116672	A	19941021	199521	B
JP 7169343	A	19950704	JP 1994249279	A	19941014	199535	E
EP 650205	B1	19970917	EP 1994116672	A	19941021	199742	E
DE 69405678	E	19971023	DE 69405678	A	19941021	199748	E
			EP 1994116672	A	19941021		
RU 2099806	C1	19971220	RU 199437952	A	19941019	199832	E
US 5932523	A	19990803	US 1994326298	A	19941019	199937	E
EP 650205	B2	20010207	EP 1994116672	A	19941021	200109	E

Priority Applications (no., kind, date): JP 1993263382 A 19931021; JP 1994249279 A 19941014

Patent Details

Patent Number	Kind	Lan	Pgs	Draw	Filing Notes	
EP 650205	A1	EN	23	15		
Regional Designated States,Original	CH DE FR GB IT LI					
JP 7169343	A	JA	12	15		
EP 650205	B1	EN	25	15		
Regional Designated States,Original	CH DE FR GB IT LI					
DE 69405678	E	DE			Application	EP 1994116672
					Based on OPI patent	EP 650205
RU 2099806	C1	RU	20	15		
EP 650205	B2	EN				
Regional Designated States,Original	CH DE FR GB IT LI					

#### Alerting Abstract EP A1

The conductor includes a flexible long core member and several tape shaped multifilamentary oxide superconducting wires. The wires are wound on the core in a spiral. Each wire includes several filaments. The filaments include an oxide semiconductor covered by a stabilising metal, the wires form several layers, when wound side-by-side. The layers are stacked on the core. An insulating layer is placed between the layers. The core provides flexibility. The conductor maintains a superconducting state at a liquid nitrogen temperature.

USE/ADVANTAGE - For heavy current power transmission. Low loss due to structure.

**Title Terms** /Index Terms/Additional Words: FLEXIBLE; SUPERCONDUCTING; CABLE; CONDUCTOR; TAPE; SHAPE; MULTIFILAMENT; WIRE; WOUND; SIDE; INSULATE; LAYER

**Class Codes**

International Patent Classification

IPC	Class Level	Scope	Position	Status	Version Date
H01L-039/14			Main		"Version 7"
H01B-0012/12	A	I	F	R	20060101
H01L-0039/14	A	I		R	20060101
H01L-0039/24	A	I		R	20060101
H01B-0012/12	C	I	F	R	20060101
H01L-0039/14	C	I		R	20060101
H01L-0039/24	C	I		R	20060101

**US Classification, Issued:** 505231, 505230, 505232, 174125.1

File Segment: EPI;

DWPI Class: X12

Manual Codes (EPI/S-X): X12-D06A



(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 099 806** <sup>(13)</sup> **C1**  
 (51) Int. Cl.<sup>6</sup> **H 01 B 12/02, 12/06, C 04 B**  
**35/00**

RUSSIAN AGENCY  
FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: 94037952/07, 19.10.1994

(30) Priority: 21.10.1993 JP 5-263362  
14.10.1994 JP 6-249279

(46) Date of publication: 20.12.1997

(71) Applicant:  
Sumitomo Ehlektrik Indastriz, LTD (JP)

(72) Inventor: Dzan Fudzikami[JP],  
Nobukhiro Sibuta[JP], Keniti Sato[JP], Tsukusi  
Khara[JP], Khideo Isii[JP]

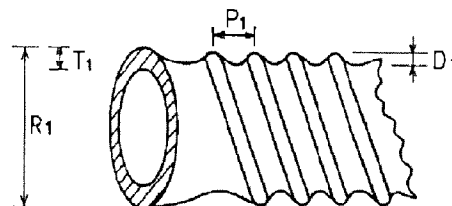
(73) Proprietor:  
Sumitomo Ehlektrik Indastriz, LTD (JP)

(54) **SUPERCONDUCTIVE CABLE WIRE**

(57) Abstract:

FIELD: electrical engineering. SUBSTANCE: proposed flexible oxide superconductive cable wire showing less losses with alternating current is composed of belt-shaped multiconductor superconductive wires. Each wire has certain number of cores composed of oxide superconductor and coated with stabilizing metal applied on frame along spiral. Superconductive wires are applied on frame with bending tension not higher than 3.0%. While applied on frame specified number of multiconductor superconductive wires are wound on core closely one to another to form first layer. Then insulation layer is laid on first layer. Insulation layer may be formed by insulating tape. Specified number of belt-shaped superconductive multiconductor wires is put on insulation layer one

adjacent to another to form second layer. Insulation layer is capable of reduction of A.C. losses. If frame is composed of metal basically than it will be preferable to lay insulation layer between frame and multiconductor superconductive wires. EFFECT: diminished AC losses. 18 cl, 15 dwg, 2 tbl



Фиг.1

RU 2 099 806 C1

RU 2 099 806 C1



(19) RU<sup>(11)</sup> 2 099 806<sup>(13)</sup> C1  
(51) МПК<sup>6</sup> H 01 B 12/02, 12/06, C 04 B  
35/00

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21), (22) Заявка: 94037952/07, 19.10.1994

(30) Приоритет: 21.10.1993 JP 5-263382  
14.10.1994 JP 6-249279

(46) Дата публикации: 20.12.1997

(56) Ссылки: DE, патент, 4006094, кл. H 01 B  
12/00, 1991.

(71) Заявитель:  
Сумитомо Электрик Индастриз, ЛТД (JP)

(72) Изобретатель: Дзан Фудзиками[JP],  
Нобухиро Сибута[JP], Кенити Сато[JP], Цукуси  
Хара[JP], Хидео Исии[JP]

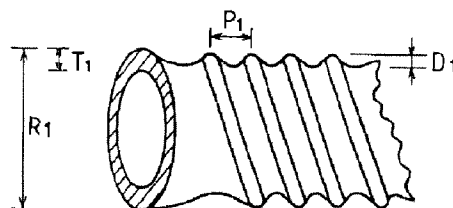
(73) Патентообладатель:  
Сумитомо Электрик Индастриз, ЛТД (JP)

(54) СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КАБЕЛЬНЫЙ ПРОВОД (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:

Использование: для изготовления сверхпроводящего кабеля. Сущность изобретения: чтобы получить гибкий оксидный сверхпроводящий кабельный провод, обладающий меньшими потерями на переменном токе, лентообразные многожильные сверхпроводящие проволоки, каждая из которых содержит некоторое количество жил, состоящих по существу из оксидного сверхпроводника, покрытых стабилизирующим металлом, наматываются по спирали на гибкий каркас. Сверхпроводящие проволоки предпочтительно наматываются на каркас при напряжении изгиба не выше 0,3%. При намотке на каркас заданное число лентообразных многожильных сверхпроводящих проволок наматывается на сердечник вплотную друг к другу, чтобы образовать первый слой. Затем на этот первый слой укладывается изоляционный слой. Изоляционный слой (20) может быть

образован из изоляционной ленты. Заданное число лентообразных сверхпроводящих многожильных проволок наматывается на изоляционный слой вплотную друг к другу, чтобы образовать второй слой. Изоляционный слой способен снижать потери провода на переменном токе. Если каркас состоит по существу из металла, более предпочтительно делать изоляционный слой между каркасом и многожильными сверхпроводящими проволоками. 2 с. и 16 з. п. ф-лы, 15 ил., 2 табл.



Фиг.1

RU 2 099 806 C1

RU 2 099 806 C1

Данное изобретение касается сверхпроводящего кабельного провода, в котором применяется оксидный сверхпроводник, и, в частности, касается гибкого провода, который может быть использован в сверхпроводящем кабеле.

Оксидный сверхпроводник, который становится сверхпроводящим при температуре жидкого азота, предназначен для применения в сверхпроводящем кабеле с охлаждением жидким азотом. При осуществлении применения возможно одновременно упростить систему тепловой защиты и снизить расходы на охлаждение по сравнению с металлическим сверхпроводящим кабелем, который в настоящее время требует дорогостоящего жидкого гелия.

Сверхпроводящий кабель должен быть способен передавать сильный ток при низкой потере энергии в компактном проводе. Передача энергии обычно осуществляется на переменном токе, и применение сверхпроводника для переменного тока неизбежно сопровождается потерями энергии, которую обычно называют потерями на переменном токе. Потери на переменном токе, например, потери на гистерезис, потери на соединения или потери на вихревые токи, зависят от критической плотности тока ( $j_c$ ) сверхпроводника, размера жил, структуры провода и т.п.

До настоящего времени выпускались разные виды сверхпроводящих кабелей с использованием металлических сверхпроводников с целью изучения структур для уменьшения потерь на переменном токе. Например, в японской патентной публикации N 6-36329 (1994) раскрыт сверхпроводящий провод, который содержит нормальный провод и композитные многожильные сверхпроводники, намотанные по спирали на наружной окружности нормального провода. Провод, раскрытый в этой публикации, образован намотанными по часовой стрелке и против нее слоями композитных многожильных сверхпроводников, которые попеременно наложены друг на друга. Направления намотки проводников изменяются в каждом слое для уменьшения магнитных полей, генерируемых в проводниках, чтобы таким образом снизить импеданс и повысить его токонесущую способность. В данной публикации также предложено использовать между слоями слой, обладающий высоким сопротивлением, или изоляционный слой, чтобы снизить потери на переменном токе.

Если кабельный провод образуется из оксидного сверхпроводника, технология, применяемая для металлического сверхпроводника, не может применяться как таковая. Оксидный сверхпроводник, например, керамический сверхпроводник, отличается большей хрупкостью и уязвимостью в отношении механического напряжения, чем металлический сверхпроводник. Например, в японской патентной публикации N 6-36329 (1994) раскрыт способ спиральной намотки сверхпроводников вокруг нормального провода таким образом, чтобы шаг намотки был равен диаметру каждого сверхпроводника. Однако, если, например, наматывать с таким малым шагом недавно

разработанный сверхпроводящий провод, содержащий оксидный сверхпроводник, покрытый серебряной оболочкой, то существует высокая вероятность того, что этот оксидный сверхпроводник разломается, нарушив подачу тока. Если оксидный сверхпроводник чрезмерно изогнуть, его критический ток может быть заметно снижен. Следовательно, при изготовлении кабельного провода, важным моментом является расположение оксидного сверхпроводника.

Известен сверхпроводящий кабельный провод на основе оксидов, описанный в патенте Германии N 4006094A, N 01 B 12/00, 1991.

Из выявленных аналогов наиболее близким к рассматриваемому изобретению является сверхпроводящий кабельный провод, описанный в этой же заявке Германии N 4006094A, N 01 B 12/00, 1991.

Указанный провод содержит гибкую подложку (гофрированную трубку) для множества многожильных оксидных сверхпроводящих проволок, покрытых (один из вариантов) стабилизирующим материалом.

Отличие рассматриваемого провода от известного заключается в конструкциях подложки, оксидного сверхпроводника и их взаимном расположении, что позволяет освободиться от указанных выше недостатков.

В основу данного изобретения положена задача создать сверхпроводящий кабельный провод, обладающий гибкостью и отличной сверхпроводимостью, в частности, высоким критическим током и высокой плотностью критического тока, протекающего по оксидному сверхпроводнику.

Другой задачей, лежащей в основе данного изобретения является создание сверхпроводящего кабельного провода, в котором значительно снижены потери на переменном токе, протекающем по оксидной сверхпроводящей проволоке.

Согласно данному изобретению подложка выполнена в виде каркаса, сверхпроводящие проволоки выполнены лентообразными и намотаны по спирали на каркас в несколько последовательно расположенных, сформированных из множества этих проволок, слоев, вплотную друг к другу в каждом из них, при этом, по меньшей мере, между этими несколькими слоями расположен электроизоляционный слой.

Желательно, чтобы сверхпроводящие проволоки были намотаны на каркас при напряжении изгиба менее 0,3%

Желательно, чтобы электроизоляционный слой был расположен между множеством лентообразных сверхпроводящих проволок, по меньшей мере, в любом из последовательно расположенных слоев.

Желательно, чтобы каркас был выполнен из металла.

Желательно, чтобы каждый электроизоляционный слой был образован путем спиральной намотки изоляционной ленты в продольном направлении каркаса.

Желательно, чтобы каждый электроизоляционный слой был образован из изоляционной ленты, причем изоляционная лента была бы уложена между соседними лентообразными сверхпроводящими проволоками, по меньшей мере, в любом из некоторого числа слоев и спирально

намотана вдоль соседних сверхпроводящих проволок с возможностью покрыть основную поверхность, обращенную к каркасу, одной из соседних сверхпроводящих проволок и одну основную поверхность другой сверхпроводящей проволоки, противоположной от каркаса в парах противоположных основных поверхностей соответствующих проволок.

Желательно, чтобы лентообразные многожильные оксидные сверхпроводящие проволоки были покрыты электроизоляционными слоями.

Желательно, чтобы каркас был выполнен из металлической трубки со спиральной канавкой или металлической гофрированной трубки.

Желательно, чтобы провод содержал металлическую ленту, намотанную по спирали на каркас, и изоляционную ленту, намотанную по спирали на гладкую поверхность, образованную металлической лентой, причем лентообразные многожильные сверхпроводящие проволоки спирально намотаны на изоляционную ленту.

Желательно, чтобы в лентообразных проволоках жилы были скручены (твистированы).

Поставленная задача решается также тем, что согласно изобретению подложка выполнена в виде каркаса, сверхпроводящие проволоки выполнены лентообразными и намотаны по спирали на каркас с натяжением не более  $2 \text{ кг/мм}^2$  при напряжении изгиба менее  $0,3\%$  в несколько последовательно расположенных, сформированных из множества этих проволок, слоев, вплотную друг к другу в каждом из них, при этом, по меньшей мере, между этими несколькими слоями и между лентообразными сверхпроводящими проволоками и каркасом расположен электроизоляционный слой.

Желательно, чтобы провод содержал электроизоляционный слой между множеством лентообразных сверхпроводящих проволок, по меньшей мере, в любом из последовательно расположенных слоев.

Желательно, чтобы каждый электроизоляционный слой был образован путем спиральной намотки изоляционной ленты в продольном направлении каркаса.

Желательно, чтобы каждый изоляционный слой был образован из изоляционной ленты, причем изоляционная лента укладывается между соседними лентообразными сверхпроводящими проволоками, по меньшей мере, в любом из некоторого числа слоев и был спирально намотан вдоль соседних сверхпроводящих проволок с возможностью покрыть основную поверхность, обращенную к каркасу, одной из соседних сверхпроводящих проволок и одну основную поверхность другой сверхпроводящей проволоки, противоположной от каркаса в парах противоположных основных поверхностей соответствующих проволок.

Желательно, чтобы множество лентообразных многожильных оксидных сверхпроводящих проволок, предварительно покрытых изоляционными слоями, наматывались на каркас.

Желательно, чтобы каркас являлся металлической трубкой со спиральной канавкой или металлической гофрированной трубкой.

Желательно, чтобы провод содержал металлическую ленту, намотанную по спирали на каркас, и изоляционную ленту, намотанную на ровную поверхность, образованную металлической лентой, причем лентообразные многожильные оксидные сверхпроводящие проволоки спирально были намотаны на изоляционную ленту.

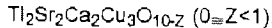
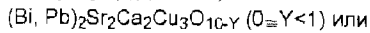
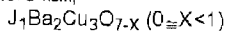
Желательно, чтобы в лентообразных проволоках жилы были скручены.

Приведенные выше и прочие признаки, и преимущества данного изобретения станут более очевидными из следующего ниже подробного описания вариантов выполнения изобретения со ссылками на прилагаемые чертежи.

На фиг.1 дан частичный вид сердечника со спиральными канавками используемого в данном изобретении; на фиг.2 перспективный вид, изображающий частично гофрированный сердечник, используемый в данном изобретении; на фиг.3 перспективный вид, изображающий сердечник в форме спиральной ленты, используемый в данном изобретении; на фиг.4 общий вид лентообразной многожильной оксидной сверхпроводящей проволоки, намотанной по спирали на сердечник; на фиг.5 перспективный вид конкретного примера сверхпроводящего кабельного провода согласно данному изобретению; на фиг.6 вид в сечении, изображающий многослойную структуру жил и изоляционного материала в проводе, изображенном на фиг. 5; на фиг.7 вид в сечении, изображающий конкретный пример такой структуры, в которой изоляционные ленты располагаются между соседними лентообразными многожильными сверхпроводящими проволоками согласно данному изобретению; на фиг. 8 перспективный вид, изображающий положения жил, перевитых в многожильной оксидной сверхпроводящей проволоке; на фиг.9 - перспективный вид, изображающий другую форму сердечника; на фиг.10 а,б виды в сечении, изображающие процесс намотки сверхпроводящих многожильных проволок на сердечник без прокладки изоляционным слоем; на фиг.11 зависимость между величиной потерь на переменном токе на одну жилу и возбуждающими токами в проводах, полученных за счет укладки сверхпроводящих многожильных проволок; на фиг. 12 перспективный вид, изображающий другой пример предложенного провода; на фиг. 13 вид в сечении провода, изображенного на фиг.12; на фиг.14 вид в сечении еще одного примера предложенного провода; на фиг.15 а,б виды в сечении, изображающие сверхпроводящую многожильную проволоку, покрытую изоляционным слоем, и еще один пример предложенного провода, изготовленного из сверхпроводящих многожильных проволок, соответственно покрытых изоляционными слоями.

Согласно данному изобретению каждая лентообразная многожильная оксидная сверхпроводящая проволока имеет, как правило, такую структуру, когда несколько жил, состоящих по существу из оксидного сверхпроводника, погружены в стабилизирующий материал, каковым является серебро или его сплав. Оксидный сверхпроводник может быть выполнен из

оксида на основе иттрия, висмута или таллия, такого как,



Керамический сверхпроводник на основе висмута предпочтителен с точки зрения высокой критической температуры, высокой плотности тока, низкой токсичности и легкости изготовления из него проволоки. Лентообразная сверхпроводящая проволока изготавливается, как правило, за счет выполнения операций подготовки сырьевого порошка для оксидного сверхпроводника, загрузки порошка в оболочку из стабилизирующего материала, пластической обработки и спекания. На стадии подготовки сырьевого порошка порошкообразные оксиды или карбонаты элементов для образования сверхпроводника перемешиваются в заданных соотношениях и спекаются, после чего эта спеченная смесь дробится, чтобы получить сырьевой порошок. Этот порошок загружается в оболочку, которая состоит по существу, например, из серебра или его сплава. Операция пластической обработки представляет собой, например, путем волочения и прокатки. После прокатки проволоку, которой придана форма ленты, спекают при температуре приблизительно 800-900°C, предпочтительно 840-850°C, чтобы сверхпроводник, снабженный оболочкой, приобрел высокую степень ориентации и высокую плотность критического тока. Для изготовления многожильной проволоки некоторое число проволок, полученных после волочения, собирается вместе и подвергается пластической обработке и спеканию. В описанном выше процессе можно получить практически сверхпроводящую монофазу, имеющую высокую степень ориентации, за счет комбинации пластической обработки и спекания. Жилы лентообразной сверхпроводящей проволоки, полученные с помощью описанного выше способа, имеют практически однородные сверхпроводящие фазы в продольном направлении ленточной проволоки, в то время как с-оси сверхпроводящих фаз ориентированы по существу параллельно направлению толшины ленточной проволоки. Жилы образованы из кристаллических зерен в виде хлопьев, вытянутых в продольном направлении ленточной проволоки, которые прочно соединены друг с другом. Хлопьевидные кристаллические зерна уложены в направлении толшины ленточной проволоки. Такая лентообразная сверхпроводящая проволока практически не ограничена в размере, но имеет, например, ширину 1,0-10 мм, предпочтительно 2-6 мм, в толщину 0,05-1 мм, предпочтительно 0,1-0,4 мм. При таких размерах ленточная проволока, содержащая жилы с упомянутой выше структурой, может сохранять критическую плотность тока, например,  $4 \cdot 10^3 - 3,0 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ . Ленточная проволока, содержащая жилы с описанной выше структурой, обладает относительной устойчивостью к изгибу и сохраняет высокую критическую плотность тока, даже когда ее подвергают определенному напряжению изгиба, как будет описано ниже.

Лентообразная многожильная сверхпроводящая проволока может содержать от 7 до 10000 жил, предпочтительно 37-1000 жил.

В предложенном проводе сердечник, который, как правило, называют каркасом, способен держать лентообразные сверхпроводящие проволоки под напряжением изгиба в заданном интервале. Этот каркас имеет длину, необходимую для сверхпроводящего кабельного провода, и находится в центре этого провода. Каркас имеет практически цилиндрическую или спиральную форму, чтобы его можно было обматывать ленточными проволоками, и, как правило, имеет практически одинаковый диаметр по всей длине. Каркас может состоять по существу по меньшей мере из одного материала, выбранного из группы, включающей в себя, например, нержавеющую сталь, медь, алюминий и упрочненный волокном пластик (FRP).

Согласно данному изобретению каркас выполняется предпочтительно в виде трубчатого элемента, обладающего гибкостью. Например, возможно предпочтительное применение трубки со спиральной канавкой (ниже именуемой как спиральная трубка) в качестве каркаса, имеющего достаточную прочность и гибкость (фиг. 1). Гофрированная трубка, содержащая гофры, также может быть предпочтительно использована в качестве каркаса, как показано на фиг. 2. На фиг. 1 и 2 обозначения  $R_1$  и  $R_2$  обозначают, соответственно, наружные диаметры,  $T_1$  и  $T_2$  толщину,  $P_1$  и  $P_2$  - шаг и  $D_1$  и  $D_2$  зазоры. Кроме того, каркас может быть также изготовлен из скрученного в виде спирали материала, например, так называемой спиральной стальной полосы, показанной на фиг. 3. Любое из этих конструктивных выполнений способно обеспечить каркас достаточной гибкостью. Спиральная трубка или гофрированная трубка может быть также выполнена из нержавеющей стали, меди, алюминия или FRP. Гибкий каркас обеспечивается гибкость предложенного провода. Этот гибкий провод может быть намотан на барабан.

Согласно данному изобретению можно намотать на каркас от нескольких десятков до тысяч лентообразных многожильных сверхпроводящих проволок. Ленточные проволоки наматываются по меньшей мере в два или более слоев, причем их основные поверхности обращены к каркасу. Каждый слой может быть сформирован из произвольного числа ленточных проволок. Когда несколько десятков ленточных проволок намотано на каркас параллельно друг другу, так что поверхности каркаса заполнены ими, на них наматывается еще несколько десятков ленточных проволок. Когда на первый слой намотано достаточное количество ленточных проволок в виде второго слоя, на них наматывается третий слой ленточных проволок. Между каждой соседней парой слоев укладывается изоляционный слой.

Согласно данному изобретению каждая лентообразная многожильная оксидная сверхпроводящая проволока наматывается на каркас, например, как показано на фиг. 4. На фиг. 4 ленточная проволока 11 наматывается на каркас 10, имеющий

заданный диаметр, при напряжении изгиба или кривизне в заданном интервале и с шагом (Р) заданного интервала. При этом основная поверхность 11а ленточной проволоки 11 обращена к каркасу 10. Следовательно, относительно свободный изгиб прикладывается к ленточной проволоке 11 в продольном направлении. Если это напряжение изгиба определяется в соответствии с приведенной ниже формулой, ленточная проволока 11, которая намотана на каркас 10, изгибается при напряжении изгиба не более 0,5% предпочтительно, не более 0,3%. Сверхпроводимость ленточной проволоки 11 вряд ли ухудшится при таком напряжении изгиба по сравнению со сверхпроводимостью в прямолинейном состоянии.

Напряжение изгиба (%) (толщина лентообразной сверхпроводящей проволоки/(диаметр изгиба + ее толщина))  $\cdot 100$ .

Когда лентообразная сверхпроводящая проволока толщиной  $t$  спирально наматывается на каркас, имеющий диаметр  $D$ , с шагом  $P$ , изгибающее напряжение  $E$  получают согласно следующему уравнению. Согласно данному изобретению предпочтительно установить такой шаг  $P$  и диаметр  $D$  каркаса, чтобы напряжение изгиба  $E$  было не более 0,3%.

$$E \leq 100/(D_1 + t)$$

$$D_1 = (P^2 + (\pi D)^2)^{1/2} / \pi$$

Согласно данному изобретению каждая лентообразная оксидная сверхпроводящая проволока предпочтительно наматывается на каркас с натяжением не более 2 кг/фут, например в интервале 0,5-2 кг/фут.

Сердечник (каркас) может быть выполнен либо из электроизоляционного материала, либо из электрического проводника. Электроизоляционный материал предпочтителен с точки зрения снижения потерь на переменном токе, в то время как металл, являющийся электрическим проводником, предпочтителен с точки зрения прочности. Металлической трубке со спиральной канавкой или металлической гофрированной трубке отдается особое предпочтение как сердечнику для придания проводу гибкости с сохранением его прочности. Металлический сердечник может быть также использован для передачи аномального тока после аварии. В этом случае, можно установить оптимальное сопротивление сердечника с точки зрения потерь на переменном токе в проводе и нагрузке сердечника для этого аномального тока.

Если в качестве сердечника используется металлическая трубка со спиральной канавкой или металлическая гофрированная трубка, предложенный провод может также содержать металлическую ленту, которая наматывается на сердечник по спирали, и изоляционную ленту, наматываемую по спирали на ровную поверхность, образованную металлической лентой. Металлическая лента может образовывать ровную поверхность для покрытия канавок сердечника таким образом, чтобы сверхпроводящие ленты не выпячивались за счет этих канавок, и для приема сверхпроводящих лент. Возможно закрыть канавки, сохраняя гибкость сердечника, путем

намотки металлической ленты. Изоляционная лента, которая наматывается на металлическую ленту, пресекает электрическую связь между сердечником, металлической лентой и сверхпроводящими лентами. Изоляционную ленту можно заменить электроизоляционным слоем, состоящим по существу из другого материала. Если сердечник выполнен из металла, предпочтительно, чтобы он был электрически изолирован от сверхпроводящих лент.

Согласно данному изобретению электроизоляционный слой выполняется по меньшей мере между слоями, каждый из которых сформирован из нескольких сверхпроводящих лент. Кроме того, можно также ввести электроизоляционный слой между несколькими расположенными вплотную лентообразными сверхпроводящими проволоками по меньшей мере в любом из этого числа слоев. Если сердечник состоит по существу из металла, как описано выше, электроизоляционный слой предпочтительно также выполнять между сердечником и лентообразными сверхпроводящими проволоками. В качестве альтернативы, на сердечник может быть намотано некоторое число лентообразных многожильных сверхпроводящих проволок, предварительно покрытых изоляционными слоями. Согласно данному изобретению изоляционный слой пресекает электрическую связь между сверхпроводящими лентами, снижая таким образом потери провода на переменном токе.

На фиг. 5 и 6 показана типичная изоляция между слоями и изоляция между сверхпроводящими проволоками в сплечах. Изоляционные материалы 50 расположены соответственно между сверхпроводящими жилами 51. Межслойный изоляционный слой 60 расположен между первым и вторым слоями 61 и 62, которые образованы заданным числом сверхпроводящих лент, в то время как второй слой 61 также покрыт изоляционным слоем 65. Изоляционные материалы 50 образованы шнурообразными или лентообразными элементами, которые спирально намотаны на сердечник 55. Межслойный изоляционный слой 60 и изоляционный слой 65 могут быть сформированы из широких лентообразных или полоскообразных элементов. Эти материалы наматываются по спирали на жилы 51.

Согласно данному изобретению материалы, изолирующие сердечники, предпочтительно имеют форму лентообразных или шнурообразных элементов, чтобы сохранить гибкость сердечника и получить сверхпроводящий кабельный провод нужной гибкости. Следовательно, электроизоляционный слой также предпочтительно формируется из лентообразных или шнурообразных элементов. При этом можно сформировать изоляционный слой путем спиральной намотки изоляционной ленты или изоляционного шнура в продольном направлении сердечника. Изоляционная лента или шнур может быть намотан с натяжением, например, 0,5-2 кг/фут.

Для создания электроизоляционного слоя между несколькими расположенными вплотную сверхпроводящими лентами



каждого слоя можно использовать, например, сверхпроводящие ленты, предварительно полностью покрытые изоляцией. Однако относительно трудно удовлетворительно покрыть изоляцией поверхности плоских лент, особенно, на их краях, и это дорогостоящая операция. Если уложить сверхпроводящие ленты, не имеющие покрытия на краях, вплотную, между ними возникнет электрическая связь. Если между сверхпроводящими лентами, уложенными вплотную друг к другу одним слоем, имеется электроизоляционный слой, тогда предпочтительно расположить изоляционную ленту, как показано на фиг.7. На фиг.7 каждая изоляционная лента 70 располагается между соседними сверхпроводящими лентами 71 и 71'. Изоляционная лента 70 намотана по спирали вдоль сверхпроводящих лент 71 и 71', чтобы покрыть одну основную поверхность 71a сверхпроводящей ленты 71, а также одну основную поверхность 71'b сверхпроводящей ленты 71'. Иными словами, изоляционная лента 70 покрывает основную поверхность 71a сверхпроводящей ленты 71, которая находится ближе к сердечнику, и основную поверхность другой сверхпроводящей ленты 71', которая расположена напротив сердечника в парах противоположных основных поверхностей (поверхности 71a и 71b ленты 71 и поверхности 71'a и 71'b ленты 71') соответственно лент 71 и 71'. За счет такой компоновки одна из сверхпроводящих лент полностью изолирована от другой, решая таким образом упомянутую выше проблему краевых частей. Кроме того, можно также изолировать слои друг от друга путем намотки изоляционной ленты приведенным выше способом.

Изоляционный слой может быть выполнен из изоляционного материала, например, каптона (kapton материал на основе полиамида), полипропиленовой слоистой бумаги (PPLP), полтэтилена (PE) или крафтовой бумаги, при этом изоляционный материал предпочтительно не должен обладать такими недостатками, как растрескивание в жидком азоте. Изоляционный материал для образования изоляционного слоя используется в виде бумаги, листа, пленки, ткани или ленты. Предпочтительная толщина изоляционного слоя не должна быть более 0,1 мм, чтобы обеспечить компактность провода. С другой стороны, изоляционный слой, который был ранее сформирован на каждой сверхпроводящей ленте, состоит, например, предпочтительно по существу, из эмали.

Согласно данному изобретению можно использовать лентообразные многожильные проволоки с кручеными (твистированными) жилами. На фиг.8 изображена такая сверхпроводящая проволока. На этой фигуре жилы 2, образующие сверхпроводящую многожильную проволоку 1 скручены, например, с заданным шагом L. За счет такого скручивания жил 2 индукционный ток, проходящий между стабилизирующим металлом 3 и жилами 2 разделяется в каждом шаге закручивания L на маленькие петли, и, следовательно, величина этого тока ограничена. Таким образом, подавляется выделение тепла Джоуля в стабилизирующем металле 3 и снижаются потери на

переменном токе по сравнению со сверхпроводящей проволокой, жилы которой не скручены. Можно изготовить многожильную проволоку со скрученными жилами следующим образом. Сначала некоторое число одножильных проволок, жилы которых выполнены из оксидного сверхпроводника, заключаются в металлическую трубку, и эту металлическую трубку вытягивают в проволоку. Затем эту проволоку скручивают в состоянии круглой проволоки, чтобы сформировать витые жилы. После этого, проволоку вновь вытягивают, а затем прокатывают и термообработывают. За счет таких операций диаметр и толщина жил изменяются во время волочения, прокатки и т.п. причем их витая форма сохраняется. При кручении, волочении и прокатке шаг закручивания предпочтительно устанавливается на уровне, превышающем более чем в пять раз, а предпочтительно, в десять раз, диаметр скручиваемой проволоки, так что проволока не разделяется.

Сверхпроводящий кабельный провод согласно данному изобретению обладает такой гибкостью, которая практически не ухудшается даже когда его изгибают с диаметром изгиба до 1,5 м, предпочтительно 2,6 м. Этот провод может наматываться на барабан для хранения и транспортировки.

Согласно данному изобретению можно получить длинный оксидный сверхпроводящий кабельный провод, обладающий не только гибкостью, но и отличной сверхпроводимостью. В данном изобретении вихревой ток или ток соединения, передаваемый между и проходящий через сверхпроводящие ленты, подавляется изоляционным слоем, предусмотренным данным изобретением. Благодаря этому изоляционному слою можно снизить потери жилы на переменном токе по меньшей мере на порядок. Согласно данному изобретению предлагается другой провод для практического применения в сверхпроводящем кабеле для переменного тока.

Ниже следует подробное описание данного изобретения.

Исследования напряжения изгиба в сверхпроводящей ленте, намотанной на каркас.

Оксиды или карбонаты перемешивались при следующем соотношении Bi, Pb, Sr, Ca и Cu в составе: 1,84:0,36:1,99:2,18:3,00. Этот смешанный порошок подвергали термообработке до получения порошка, содержащего 85% фазы 2212 и 15% фазы 2223 как сверхпроводящие фазы, в то же время сохраняя в основном  $(Ca_{1-x}Sr_x)_2PbO_4$  и  $Ca_2CuO_3$  в качестве несверхпроводящих фаз. Обработанный таким образом порошок загружали в серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм, эту серебряную трубку вытягивали до диаметра 1,3 мм. Определенное число жил, полученных таким образом, помещали в серебряную трубку заданного размера, эту серебряную трубку вытягивали до диаметра 1,0 мм. Полученную проволоку подвергали термообработке при 845°C в течение 55 ч, после чего прокатывали при вытяжке на 15%. Полученную ленточную проволоку подвергали термообработке при 838°C в течение 48 ч. С помощью упомянутого способа было

получено шесть видов лентообразной сверхпроводящей проволоки, показанных в табл.1. Критические плотности тока ( $J_c$ ) этих ленточных проволок измеряли в жидком азоте, когда ленточные проволоки находились в прямолинейном состоянии и когда они были изогнуты с заданными диаметрами изгиба. В табл.2 показаны величины критических плотностей тока  $J_c$ , которые были измерены для пяти напряжений изгиба. Как видно из табл. 1 и 2, снижение критической плотности тока  $J_c$  проволоки, к которой было приложено напряжение изгиба, уменьшается с уменьшением процента толщины сверхпроводника от толщины проволоки. Этот процент предпочтительно составляет не более 10% с другой стороны, каждая проволока предпочтительно содержит по меньшей мере 37 жил. В сверхпроводящей проволоке, содержащей по меньшей мере 61 жилу, критическая плотность тока  $J_c$  не уменьшается существенно при изгибе на 0,5%. Ясно, что можно на практике выдерживать изгиб многожильной сверхпроводящей проволоки, полученной согласно упомянутому выше способу, при напряжении изгиба не более 0,5% предпочтительно не более 0,3%.

Изменение потерь на переменном токе.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{CuO}$  перемешивали, чтобы получить состав с содержанием  $\text{Bi}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ca}$  и  $\text{Cu}$  в соотношениях 1,81:0,40:1,98:2,21:3,03. Перемешанный порошок подвергали термообработке несколько раз с дроблением после каждой операции термообработки. Порошок, полученный после термообработки и дробления, еще раз измельчали в шаровой мельнице, чтобы получить порошок на субмикронном уровне. Этот порошок подвергали термообработке при 800°C в течение 2 ч и загружали в серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм.

Серебряную трубку с порошком вытягивали и разрезали на несколько проволок, которые затем помещались в другую серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм, чтобы изготовить многоканальную проволоку, содержащую 61 жилу. Эту многоканальную проволоку еще раз подвергали волочению, прокатывали до ширины 3,0 мм и толщины 0,22 мм, а затем подвергали термообработке. После этого проволоку прокатывали до толщины 0,20 мм и вновь термообработывали, получая таким образом покрытую серебром сверхпроводящую проволоку из окиси висмута, содержащую 61 жилу.

Затем стальную ленту толщиной 0,33 мм и шириной 10 мм наматывали по спирали для получения каркаса с наружным диаметром R 19 мм, шагом крутки L 4 мм и зазором D 2 мм, как показано на фиг.9.

Полученные описанным выше способом лентообразных многожильных сверхпроводящих проволок наматывали по спирали на каркас вплотную друг другу при шаге закручивания 250 мм. На фиг.10(a) показан вид в сечении полученного однослойного провода. На этой фигуре сверхпроводящие многожильные проволоки 11 намотаны на каркас 10 вплотную друг к другу. Полученный однослойный провод имел величину критического тока ( $I_c$ ) 550 А.

После этого 22 сверхпроводящих многожильных проволоки наматывали по спирали на однослойный провод вплотную друг к другу при шаге закручивания 250 мм, в направлении, противоположном направлению намотки первого слоя. На фиг. 10(b) изображен вид в сечении полученного двухслойного провода. Сверхпроводящие многожильные проволоки 11' наматывались далее на сверхпроводящие проволоки 11, намотанные на каркас 10. Критический ток  $I_c$  полученного двухслойного провода составлял 850 А.

В этом проводе величина потерь на переменном токе измерялась в состоянии однослойного провода, содержащего 20 жил, и двухслойного провода, содержащего 42 жилы. На фиг.11 изображены зависимости между величинами потерь на переменном токе на одну жилу и токами возбуждения для соответствующих случаев. На этой же фигуре также показана зависимость между потерями на переменном токе и током возбуждения в каждой жиле, имеющей критический ток  $I_c$  величиной 20 А, который измеряли перед изготовлением провода. На фиг.11 черные кружочки, белые кружочки и черные треугольники соответственно показывают измеренные величины для каждой жилы, однослойного и двухслойного провода. Как изображено на фиг.11, однослойный провод проявляя характеристики переменного тока, практически идентичные этим же характеристикам несобранной жилы. В двухслойном проводе, с одной стороны, потери на переменном токе на одну жилу возрастали по сравнению с потерями в отдельной жиле. Этим экспериментом было доказано, что однослойный провод имеет меньше потери на переменном токе, чем многослойный. Предполагалось, что это объясняется образованием вихревого тока или тока соединения, передаваемого и проходящего через слои, чего нет в однослойном проводе. Для проверки этой гипотезы были изготовлены сверхпроводники, снабженные изоляционным материалом между слоями для отсечки электропроводимости, чтобы таким образом снизить потери на переменном токе в многослойных проводах.

#### Пример 1

20 многожильных проволок, полученных описанным выше способом, наматывали на каркас из спиральной трубки с наружным диаметром 19 мм и толщиной 0,3 мм с зазором 2 мм при шаге 4 мм, как изображено на фиг.1, вплотную друг к другу. Эти проволоки наматывали с шагом 250 мм. Затем изоляционный материал, изготовленный из бумаги PPLP толщиной 140 микрон и шириной 30 мм спирально наматывали на многожильные проволоки в один слой с шагом 40 мм и зазором 0,5 мм. После этого 22 жилы, идентичных описанным выше, спирально наматывали сверху с шагом 250 мм в направлении, противоположном направлению намотки первых проволок.

На фиг. 12 и 13 изображен полученный провод. В полученном двухслойном проводе проволоки 11 намотаны на каркас 10 вплотную друг к другу для образования первого слоя, как показано на фиг.12 и 13. Изоляционный слой 20 из бумаги PPLP имеется на сверхпроводящих многожильных

проволоках 11, в то время как сверхпроводящие многожильные проволоки 11' намотаны на них рядом друг с другом, чтобы образовать второй слой. Полученный таким способом провод имел критический ток  $I_c$  850 А. В этом проводе потери на переменном токе были снижены приблизительно на порядок по сравнению с двухслойным проводом, изготовленным без изоляционного слоя. С точки зрения потерь на переменном токе на одну жилу, потери в проводе достигали уровня потерь отдельной несобранной жилы. Благодаря описанному выше эксперименту было доказано, что наличие изоляционного слоя между слоями многослойного провода благоприятно действует на снижение потерь на переменном токе.

Хотя приведенный выше пример описан со ссылкой на двухслойный провод, возможно получение эффекта от использования изоляционного слоя также со сверхпроводящими многожильными проволоками, наложенными друг на друга в три или более слоев. Например, как показано на фиг.14, можно получить компактный провод с пониженными потерями на переменном токе и передачей сильного тока путем последовательной укладки первого слоя сверхпроводящих многожильных проволок 31, изоляционного слоя 32, второго слоя сверхпроводящих многожильных проволок 33, изоляционного слоя 34, третьего слоя сверхпроводящих многожильных проволок 35, изоляционного слоя 36 и четвертого слоя сверхпроводящих многожильных проволок 37.

Возможно также покрыть поверхности сверхпроводящих многожильных проволок изоляционными слоями для намотки этих проволок на каркас. Например, сверхпроводящая многожильная проволока 41 покрыта изоляционным слоем 40, как показано на фиг.15а. Можно намотать некоторое количество таких сверхпроводящих многожильных проволок 41 на каркас 56, как показано на фиг.15б. Хотя такое конструктивное выполнение требует много времени для покрытия изоляцией и больших расходов по сравнению с вариантом, при котором изоляционный материал прокладывается между слоями, в этом случае получается более надежная изоляция.

#### Пример 2

$\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , и  $\text{CuO}$  перемешивали, чтобы получить состав с содержанием  $\text{Bi}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ca}$  и  $\text{Cu}$  в соотношениях 1,81:0,30:1,92:2,01:3,03. Перемешанный порошок подвергали термообработке несколько раз с дроблением после каждой операции термообработки. Порошок, полученный после термообработки и дробления еще раз измельчали в шаровой мельнице, чтобы получить порошок на субмикронном уровне. Этот порошок подвергали термообработке при  $800^\circ\text{C}$  в течение 2 ч и загружали в серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм. Серебряную трубку с порошком вытягивали и разрезали на несколько проволок, которые затем помещали в другую серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм, чтобы подготовить многожильную проволоку, содержащую 61 жилу. Эту

многожильную проволоку еще раз подвергали волочению, прокатывали до ширины 3,0 мм и толщины 0,22 мм, а затем подвергали термообработке. После этого проволоку прокатывали до толщины 0,20 мм и вновь подвергали термообработке, получая таким образом покрытую серебром сверхпроводящую проволоку из окиси висмута, содержащую 61 жилу. Эту проволоку спекали и разрезали на образцы длиной 1 м, на которых измеряли величину критического постоянного тока. Было подтверждено, что 100 образцов имели стабильный критический ток величиной  $23 \pm 1$  А.

Следующие провода изготавливали из проволок длиной 1 м и исследовали их характеристики на переменном токе. Сверхпроводящие проволоки, каждая из которых содержала 61 жилу, наматывали по спирали на каркасы из FRP длиной 1 м и с внешним диаметром 19 мм вплотную друг к другу, чтобы получить два вида однослойных проводов А и В. Эти сверхпроводящие проволоки наматывали с шагом 250 мм. В проводе А 20 проволок плотно собирались вместе без изоляционного материала между ними. В проводе В 17 сверхпроводящих проволок собирали вместе с прокладкой между ними шнуровидного изолятора диаметром 0,5 мм, который получали путем скручивания крафтовой бумаги, чтобы он мог служить как прокладка, и наматывали по спирали.

В этих проводах измеряли потери на переменном токе в жидком азоте при температуре около  $77^\circ\text{K}$  по месту возбуждения, и каждую величину потери на переменном токе определяли как произведение тока возбуждения и компоненты напряжения, находящейся в фазе с током. Каждые ток возбуждения и величину потерь делили на число использованных жил, чтобы рассчитать потери на переменном токе для отдельной жилы. Было подтверждено, что потери на переменном токе в проводе А были почти вдвое выше потерь в проводе В при том, что ток проходящий по каждой жиле, был не выше 23 А. Этот эксперимент подтвердил эффективность электрической изоляции многожильных сверхпроводящих проволок, образующих один и тот же слой, друг от друга для снижения потерь на переменном токе.

#### Пример 3

Для изготовления провода для изучения его характеристик на переменном токе использовали проволоки длиной 1 м, идентичные проволокам в примере 2.

Многожильные сверхпроводящие проволоки наматывали по спирали на медный каркас длиной 1 м с наружным диаметром 19 мм рядом друг с другом, чтобы получить однослойный провод С. Эти проволоки наматывали с шагом 250 мм. 20 проволок собирали вплотную друг к другу без прокладки между ними изоляционного материала. Потери на переменном токе для этого провода С измеряли в жидком азоте. Потери на переменном токе на одну жилу определяли также, как в примере 2, и было подтверждено, что потери в проводе С были в 2-5 раз выше потерь в проводе В при токе возбуждения в жилах не выше 23 А. Этим экспериментом было подтверждено, что потери на переменном токе в проводе возрастают, если его сердечник изготовлен из

металла и сверхпроводящие проволоки находятся в контакте с ним.

#### Пример 4

Для изготовления провода для изучения его характеристик на переменном токе использовали проволоки длиной 1 м, идентичные проволокам в примере 2.

Многожильные сверхпроводящие проволоки наматывали на алюминиевые спиральные трубки, форма которых аналогична форме, изображенной на фиг.1, длиной 1 м с наружным диаметром 28 мм, вплотную друг к другу, чтобы получить два вида однослойных проводов D и E. Сверхпроводящие проволоки наматывали с шагом 250 мм. 20 проволок собирали на каждой спиральной трубке с прокладкой между жилами крафтовой бумаги шириной 1 мм и толщиной 0,1 мм. В проводе D медную ленту наматывали по спирали на алюминиевую трубку таким образом, что многожильные сверхпроводящие проволоки наматывались по спирали в один слой. В другом проводе E медную ленту наматывали по спирали на алюминиевую трубку, а затем ленту Zumitor (на основе полиэстера) толщиной 0,1 мм наматывали по спирали сверху для электрической изоляции. Многожильные сверхпроводящие проволоки наматывали по спирали на эту изоляционную ленту в один слой.

Для каждого провода D и E потери на переменном токе на одну жилу провода измеряли в жидком азоте, и было подтверждено, что потери в проводе D в 5-10 раз превышали потери в проводе E при токе не более 23 А. Этим экспериментом была доказана возможность снижать потери на переменном токе путем расположения изоляционного материала на поверхности сердечника для сборки на нем сверхпроводящих проволок, если этот сердечник выполнен из металла.

#### Пример 5

$\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{CuO}$  перемешивали, чтобы получить состав с содержанием Bi, Pb, Sr, Ca и Cu в соотношениях 1,81:0,30:1,92:2,01:3,03. Перемешанный порошок подвергали термообработке несколько раз с дроблением после каждой операции термообработки. Порошок, полученный после термообработки и дробления, еще раз измельчали в шаровой мельнице, чтобы получить порошок на субмикронном уровне. Этот порошок подвергали термообработке при 800°C в течение 2 ч и загружали в серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм. Серебряную трубку с порошком вытягивали и разрезали на несколько проволок, которые затем помещались в другую серебряную трубку с внешним диаметром 12 мм и внутренним диаметром 9 мм, чтобы изготовить многожильную проволоку, содержащую 61 жилу. Эту многожильную проволоку еще раз подвергали волочению, прокатывали до ширины 3,0 мм и толщины 0,22 мм, а затем подвергали термообработке. После этого проволоку прокатывали до толщины 0,20 мм и вновь термообработывали, получая таким образом покрытую серебром сверхпроводящую проволоку из окиси висмута, содержащую 61 жилу. Эту проволоку спекали и разрезали на 200 образцов длиной

1 м, на которых измеряли величину критического постоянного тока. Было подтверждено, что 200 образцов имели стабильный критический ток величиной 23+2А.

Проволоки длиной 1 м использовали для получения проводов для исследования характеристик переменного тока. Многожильные сверхпроводящие проволоки, каждая из которых содержала 61 жилу, наматывали по спирали на каркасы из FRP длиной 1 м и с внешним диаметром 19 мм вплотную друг к другу в два слоя, чтобы получить пять видов двухслойных проводов F, G, H, I и J. Эти проволоки наматывали с шагом 500 мм.

В первом проводе F между соседними многожильными сверхпроводящими проволоками, собранными на каркасе в первом и втором слое, изоляционного материала не было. Кроме того, не был проложен изоляционный материал и между первым и вторым слоями. 40 проволок было плотно намотано на каркас в два слоя.

Во втором проводе G изоляционного материала не было между проволоками, образующими первый и второй слой. Но между первым и вторым слоем была намотана по спирали бумага PPLP шириной 30 мм и толщиной 0,17 мм, чтобы изолировать эти слои друг от друга. 40 многожильных сверхпроводящих проволок было намотано на каркас в два слоя.

В третьем проводе H ленты из каптона (на основе полиимида) шириной 0,5 мм и толщиной 0,2 мм были проложены между многожильными сверхпроводящими слоями как прокладки при формировании первого и второго слоя. Кроме того, намотанная по спирали лента из каптона шириной 30 мм и толщиной 0,2 мм была расположена между первым и вторым слоями.

В четвертом проводе I лента Zumitor (на основе полиэстера) шириной 5 мм и толщиной 0,02 мм прокладывалась между соседними многожильными проволоками в первом или втором слое. Эта лента Zumitor располагалась между соседними сверхпроводящими проволоками, как показано на фиг.7. Иными словами, лента Zumitor наматывалась по спирали вдоль сверхпроводящих лент, чтобы покрыть верхнюю часть одной из смежных сверхпроводящих лент, в то же время покрывая нижнюю часть другой сверхпроводящей ленты. Следовательно, можно было изолировать первый и второй слои друг от друга без прокладки изоляционной ленты между ними.

В пятом проводе J многожильные сверхпроводящие проволоки, предварительно покрытые эмалью, собирались вместе, причем между соседними сверхпроводящими проволоками в первом и втором слоях, соответственно, прокладывались ленты из каптона шириной 3 мм и толщиной 0,02 мм. Эти изоляционные ленты были расположены между сверхпроводящими проволоками аналогично проводу 1.

Потери на переменном токе измерялись для каждого из проводов F-J в жидком азоте при температуре приблизительно 77 К по методу возбуждения. Потери на переменном токе определяли как произведение тока возбуждения и напряжения, которое было в

фазе с током. Каждую величину тока возбуждения и потерь делили на число использованных жил, чтобы рассчитать потери на переменном токе из расчета на одну жилу. При подаче тока величиной 20 А на жилу, провода F, G, H, I и J продемонстрировали потери на переменном токе в размере 7; 1; 0,7; 0,7 и 0,7 мВт/м, соответственно. В областях не выше 25 А провода F и G продемонстрировали, соответственно, максимальные и следующие за максимальными потери. С другой стороны, в проводах H, I и J потери на переменном токе остались практически на одном и том же уровне во всех областях, свидетельствуя о снижении потерь на переменном токе. Таким образом, была подтверждена эффективность электрической изоляции жил друг от друга между слоями и в самом слое. Говоря точнее, структуры проводов H, I и J оказались наиболее эффективными.

Хотя данное изобретение было детально описано и проиллюстрировано, следует понимать, что это сделано исключительно в качестве иллюстрации и примера и не должно приниматься как ограничение, так как замысел и объем данного изобретения ограничен только прилагаемой формулой изобретения.

#### Формула изобретения:

1. Сверхпроводящий кабельный провод с использованием оксидного сверхпроводника, содержащий гибкую подложку для множества многожильных оксидных сверхпроводящих проволок, покрытых стабилизирующим материалом, отличающийся тем, что подложка выполнена в виде каркаса, сверхпроводящие проволоки выполнены лентообразными и намотаны по спирали на каркас в несколько последовательно расположенных, сформированных из множества этих проволок слоев вплотную друг к другу в каждом из них, при этом по меньшей мере между этими несколькими слоями расположен электроизоляционный слой.

2. Провод по п.1, отличающийся тем, что сверхпроводящие проволоки намотаны на каркас при напряжении изгиба менее 0,3%

3. Провод по пп.1 и 2, отличающийся тем, что электроизоляционный слой расположен между множеством лентообразных сверхпроводящих проволок по меньшей мере в любом из последовательно расположенных слоев.

4. Провод по пп.1, 3, отличающийся тем, что каркас выполнен из металла.

5. Провод по пп.1, 4, отличающийся тем, что каждый электроизоляционный слой образован путем спиральной намотки изоляционной ленты в продольном направлении каркаса.

6. Провод по п.3, отличающийся тем, что каждый электроизоляционный слой образован из изоляционной ленты, причем изоляционная лента уложена между соседними лентообразными сверхпроводящими проволоками по меньшей мере в любом из некоторого числа слоев и спирально намотана вдоль соседних сверхпроводящих проволок с возможностью покрыть основную поверхность, обращенную к каркасу, одной из соседних сверхпроводящих проволок и одну основную поверхность другой сверхпроводящей проволоки,

противоположной от каркаса в парах противоположных основных поверхностей соответствующих проволок.

7. Провод по любому из пп.1, 4, отличающийся тем, что лентообразные многожильные оксидные сверхпроводящие проволоки покрыты электроизоляционными слоями.

8. Провод по любому из пп.1, 7, отличающийся тем, что каркас выполнен из металлической трубки со спиральной канавкой или металлической гофрированной трубки.

9. Провод по п.8, отличающийся тем, что содержит металлическую ленту, намотанную по спирали на каркас, и изоляционную ленту, намотанную по спирали на гладкую поверхность, образованную металлической лентой, причем лентообразные многожильные сверхпроводящие проволоки спирально наматывают на изоляционную ленту.

10. Провод по любому из пп.1, 9, отличающийся тем, что в лентообразных проволоках жилы скручены (твистированы).

11. Сверхпроводящий кабельный провод с использованием оксидного сверхпроводника, содержащий гибкую подложку для множества многожильных оксидных сверхпроводящих проволок, покрытых стабилизирующим материалом, отличающийся тем, что подложка выполнена в виде каркаса, сверхпроводящие проволоки выполнены лентообразными и намотаны по спирали на каркас с натяжением не более 2 кгф/мм<sup>2</sup> при напряжении изгиба менее 0,3% в несколько последовательно расположенных, сформированных из множества этих проволок слоев вплотную друг к другу в каждом из них, при этом по меньшей мере между этими несколькими слоями и между лентообразными сверхпроводящими проволоками и каркасом расположен электроизоляционный слой.

12. Провод по п.11, отличающийся тем, что содержит электроизоляционный слой между множеством лентообразных сверхпроводящих проволок по меньшей мере в любом из последовательно расположенных слоев.

13. Провод по любому из пп. 11 и 12, отличающийся тем, что каждый электроизоляционный слой образован путем спиральной намотки изоляционной ленты в продольном направлении каркаса.

14. Провод по п.11, отличающийся тем, что каждый изоляционный слой образован из изоляционной ленты, причем изоляционная лента укладывается между соседними лентообразными сверхпроводящими проволоками по меньшей мере в любом из некоторого числа слоев и спирально наматывается вдоль соседних сверхпроводящих проволок с возможностью покрыть основную поверхность, обращенную к каркасу, одной из соседних сверхпроводящих проволок и одну основную поверхность другой сверхпроводящей проволоки, противоположной от каркаса в парах противоположных основных поверхностей соответствующих проволок.

15. Провод по любому из пп.11, 14, отличающийся тем, что множество лентообразных оксидных сверхпроводящих проволок, предварительно покрытых изоляционными слоями,

RU 2099806 C1

наматывается на каркас.  
16. Провод по любому из пп.11 15, отличающийся тем, что каркасом является металлическая трубка со спиральной канавкой или металлическая гофрированная трубка.  
17. Провод по п.16, отличающийся тем, что содержит металлическую ленту, намотанную по спирали на каркас, и

изоляционную ленту, намотанную на ровную поверхность, образованную металлической лентой, причем лентообразные многожильные оксидные сверхпроводящие проволоки спирально намотаны на изоляционную ленту.  
18. Провод по любому из пп.11 17, отличающийся тем, что в лентообразных проволоках жилы скручены.

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60

RU 2099806 C1

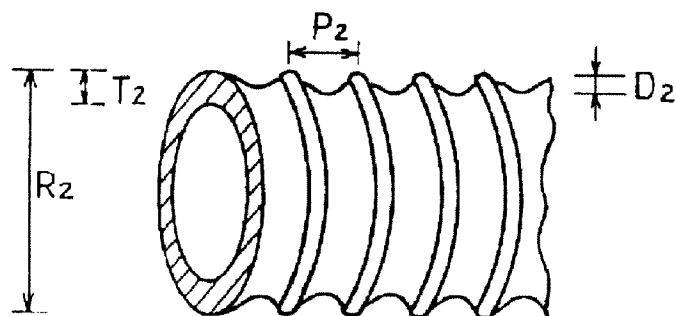
Таблица 1

	Число загруженных жил	Размер серебр. трубки		толщина сверхпроводн. _____ × 100%
		наружн. диаметр	внутренн. диаметр	толщина проволоки
1	169	26	19,5	4,0
2	91	19	14,3	5,4
3	61	15,6	11,7	6,6
4	37	12	9,0	8,6
5	19	8,7	6,5	12
6	7	5,2	3,9	20

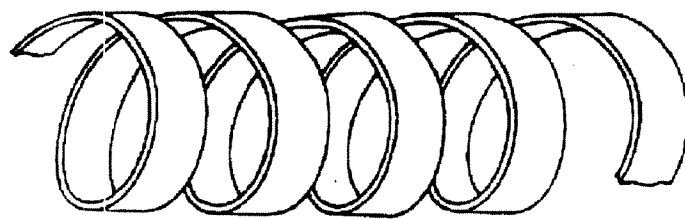
Таблица 2

	d 255 мм		d 128 мм		d 85 мм		d 64 мм		d 25 мм	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0,1	1,50 (100)	0,2	1,50 (100)	0,3	1,50 (100)	0,4	1,50 (100)	0,5	1,50 (100)
2	0,1	1,70 (100)	0,2	1,70 (100)	0,3	1,79 (100)	0,4	1,79 (100)	0,5	1,79 (100)
3	0,1	1,90 (100)	0,2	1,90 (100)	0,3	1,84 (97)	0,4	1,82 (96)	0,5	1,79 (94)
4	0,1	2,0 (100)	0,2	1,92 (96)	0,3	1,84 (92)	0,4	1,80 (90)	0,5	1,76 (88)
5	0,1	2,1 (100)	0,2	1,95 (93)	0,3	1,83 (87)	0,4	1,74 (83)	0,5	1,63 (78)
6	0,1	2,2 (100)	0,2	2,00 (93)	0,3	1,83 (83)	0,4	1,72 (78)	0,5	1,63 (74)

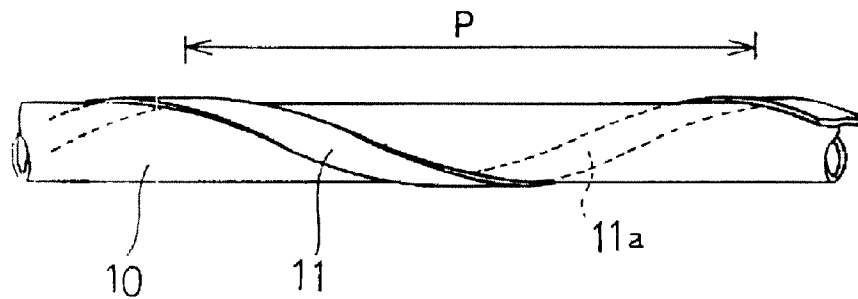
A: напряжение изгиба (%)

B:  $I_c (\times 10^4 \text{ A/m}^2)$ \*Цифры в скобках означают процент плотности критического тока  $I_c$  после изгиба по сравнению с тем же параметром до изгиба.

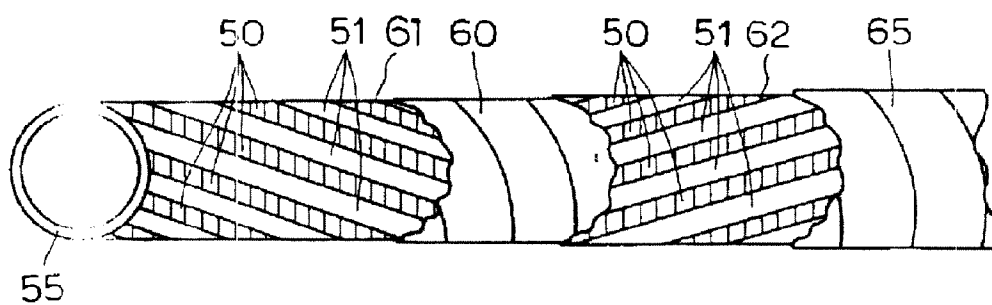
Фиг.2



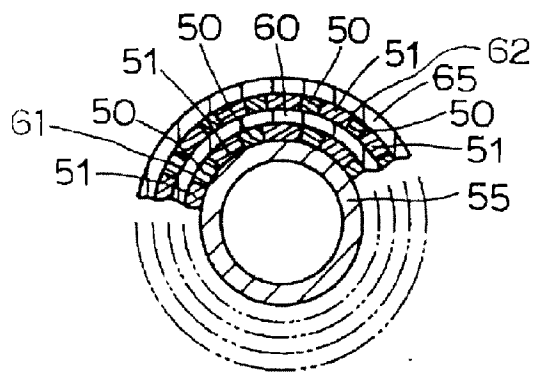
Фиг.3



Фиг.4

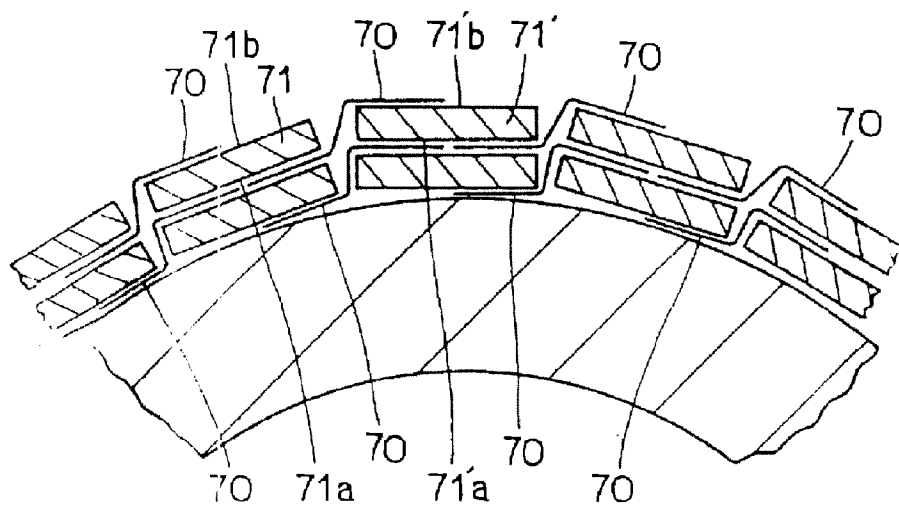


Фиг.5

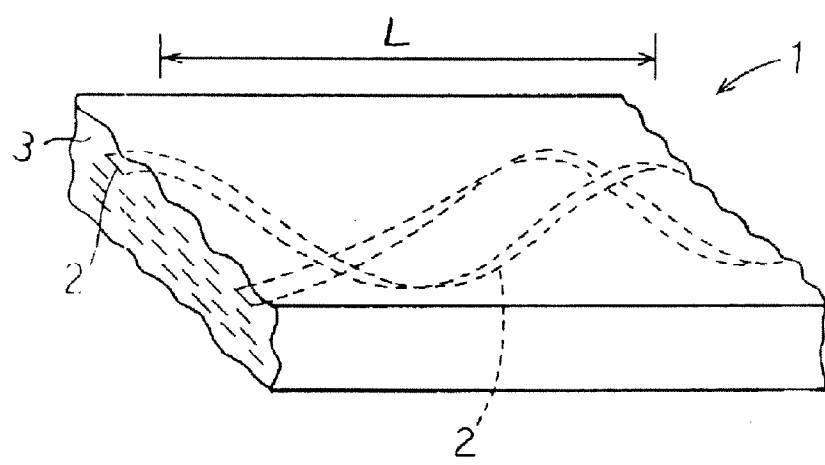


Фиг.6

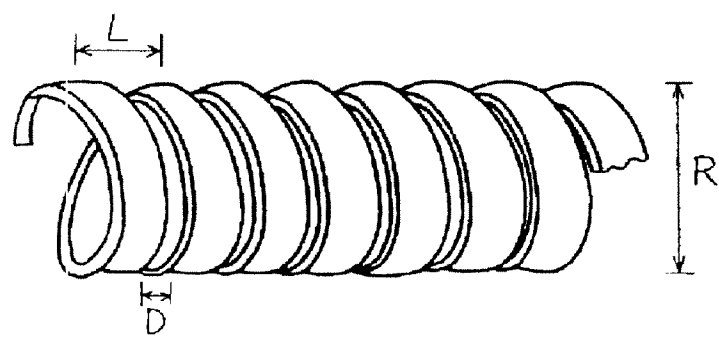




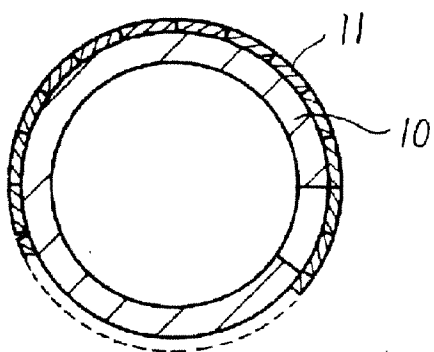
Фиг.7



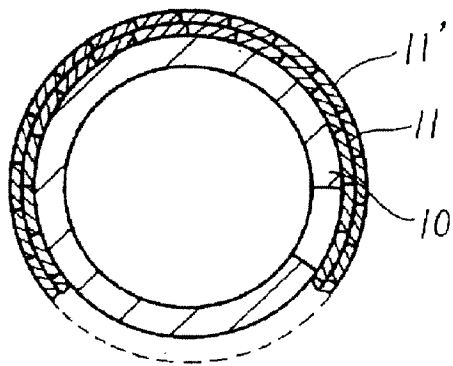
Фиг.8



Фиг.9

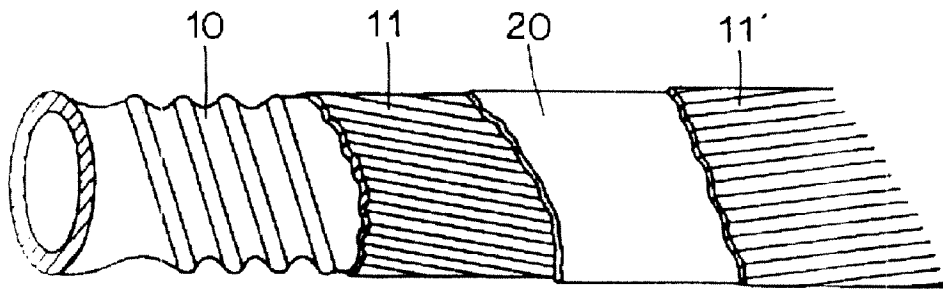
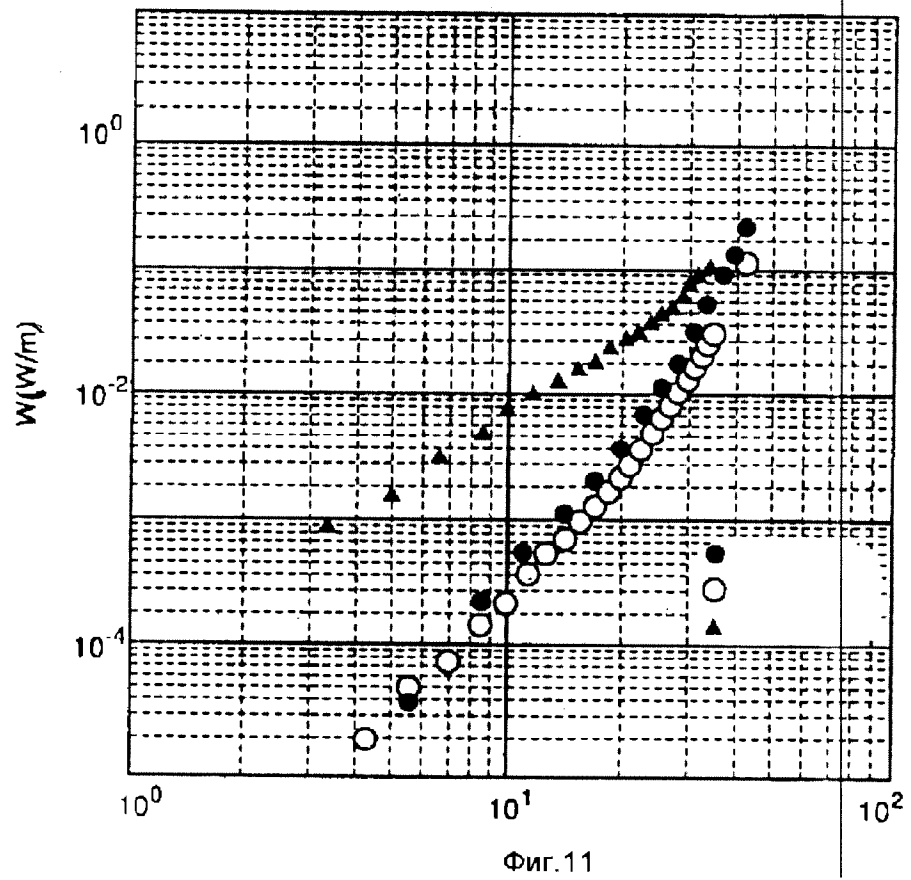


a)

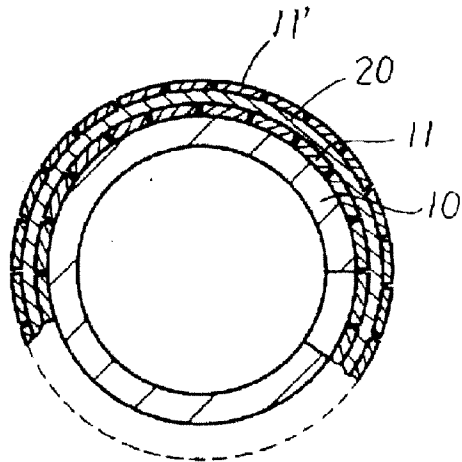


б)

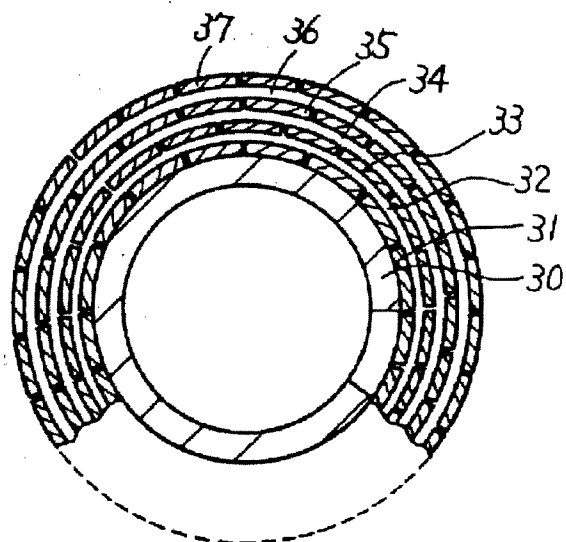
Фиг. 10



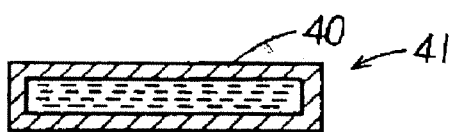
Фиг.12



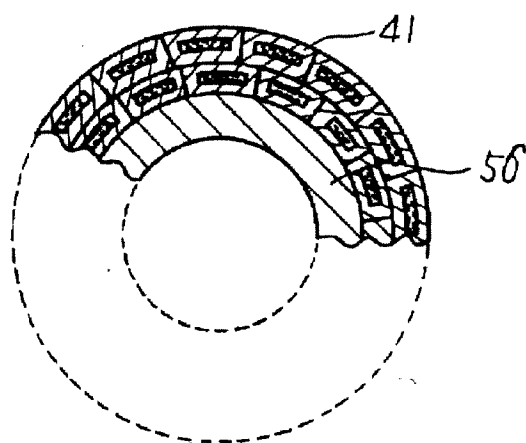
Фиг.13



Фиг.14



а)



б)

Фиг.15